

Б.М. Десятков, С.Р. Сарманаев, А.И. Бородулин

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ АЭРОЗОЛЬНЫХ «ШАПОК» НАД ПРОМЫШЛЕННЫМИ ЦЕНТРАМИ

С использованием системы уравнений динамики пограничного слоя атмосферы, включающей уравнения для компонент скорости ветра, температуры, влажности и уравнения баланса потоков энергии на подстилающей поверхности, моделируется распространение атмосферного аэрозоля над промышленным центром. Города являются источником аэрозольных загрязнений и характеризуются ярко выраженной температурной неоднородностью, что приводит к образованию специфических «шапок» примеси. Обсуждаются закономерности суточного изменения концентрации аэрозолей, полученные для различных метеословий.

Введение

Данные экспериментальных исследований [1] и визуальное наблюдение промышленных центров показывают, что над ними существуют «шапки» примесей, в которых концентрируются выбросы предприятий, автотранспорта и других источников антропогенных загрязнений.

Вследствие этого уровень загрязнения атмосферы городов оказывается повышенным и, несомненно, представляет опасность для населения, проживающего в их черте. Причина этого эффекта заключается в существенной термической неоднородности урбанизированных территорий по сравнению с территориями, не включенными человеком в процесс интенсивного промышленного производства и проживания.

В работе на основании проведенного математического моделирования процесса диффузии примесей над идеализированным промышленным центром обсуждаются закономерности изменения структуры аэрозольных «шапок» для летних условий в зависимости от времени суток.

Город был представлен в виде квадрата площадью 100 км^2 , расположенного в центре квадратной расчетной области со стороной 36 км. Вертикальная координата z была ограничена высотой пограничного слоя атмосферы, равной 1,5 км. Характеристики подстилающей поверхности вне города задавались типичными для лесостепи. В данной работе город отличался от окружающей его поверхности значением альбедо, параметром шероховатости подстилающей поверхности, а также теплофизическими характеристиками почвы, которые задавались в соответствии с [7, 8]

В работе использовалась математическая модель, разработанная в ВЦ СО РАН [2, 3] и адаптированная для городских условий в ГНЦ ВБ «Вектор». Модель основана на нелинейной нестационарной системе уравнений квазистатического пограничного слоя атмосферы в приближении Буссинеска. Для описания распространения примесей использовалось полуэмпирическое уравнение турбулентной диффу-

зии. После расщепления по физическим процессам и направлениям уравнения решались конечно-разностными методами с использованием экономических полунявных схем второго порядка аппроксимации типа Кранка–Николсона [3, 4]. Число узлов сетки по горизонтали составляло 19×19 и 15 по вертикали.

Согласно [5] основные источники загрязнения атмосферы городов разделяются на две группы: приземные (автотранспорт, мелкие котельные, печные трубы) и высотные (крупные заводы, ТЭС). Источники первого типа располагаются вблизи подстилающей поверхности (автотранспорт) либо в приземном 50-метровом слое. Вторая группа имеет высоту труб 100–200 м и более. Для этих источников температура выбрасываемой примеси всегда больше, чем температура окружающей среды. Эта особенность учитывалась заданием эффективной высоты источников [6]. Она варьируется от нескольких десятков до нескольких сотен метров. Выхлопы автотранспорта и другие приземные источники моделировались заданием потока примеси на подстилающей поверхности в черте города.

В расчетах моделировались суточные изменения скорости ветра, температуры, влажности и характеристик турбулентности, типичных для июня в Западно-Сибирском регионе при штилевых условиях и при ветре, дующем на город со скоростью 2 м/с на высоте 10 м. Затем определялись соответствующие им поля концентрации аэрозольных примесей с диаметром частиц 10 мкм от источников различных типов.

Плоскостной источник, штилевые условия

На рис. 1, *a, б* приведены изолинии концентрации и схематическое изображение векторного поля скорости ветра в вертикальной плоскости, проходящей через центр расчетной области параллельно оси x , для ночных и дневных условий в момент времени $t = 5$ и 15 ч. Значения концентрации даны в условных единицах. На рис. 2 приведены вертикальные профили концентрации для различных моментов времени над центром города (кривые 1), над окраи-

ной (кривые 2) и пригороде на расстоянии 4 км от границы города (кривые 3). Профили концентрации нормированы на соответствующее максимальное

значение, приведенное рядом с кривыми. Во избежание наложения кривых к графикам с номером 2 добавлена единица, а к кривым с номером 3 – двойка.

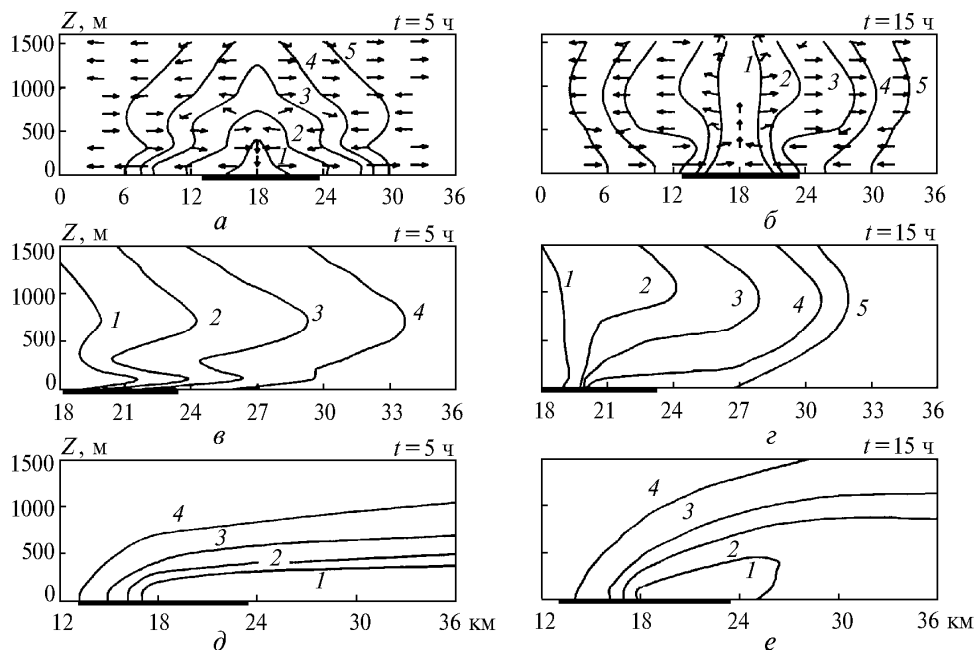


Рис. 1. Схематическое изображение векторного поля скорости ветра и изолинии концентрации примеси над городом ночью и днем для плоскостного источника и штилевых условий (*a, б*), для точечного высотного источника и штилевых условий (*в, з*) и точечного высотного источника при наличии ветра (*д, е*): *a* – изолиниям 1–5 соответствуют концентрации 3000, 380, 76, 30, 7 усл. ед.; *б* – цифры 1–5 соответствуют концентрации 67, 42, 17, 8,4, 1,7 усл. ед.; *в* – цифры 1–4 соответствуют концентрации примеси $2,2 \cdot 10^{-3}$, $4,5 \cdot 10^{-4}$, $9 \cdot 10^{-5}$, $9 \cdot 10^{-6}$ усл. ед.; *з* – цифры 1–5 соответствуют концентрации $1,5 \cdot 10^{-3}$, $3,8 \cdot 10^{-4}$, $1,9 \cdot 10^{-4}$, $7,5 \cdot 10^{-5}$ и $3,8 \cdot 10^{-5}$ усл. ед.; *д* – цифрам 1–4 соответствуют концентрации 10^{-5} , 10^{-6} , 10^{-8} , 10^{-11} усл. ед.; *е* – цифрам 1–4 соответствуют концентрации 10^{-4} , 10^{-5} , 10^{-6} , 10^{-8} усл. ед.

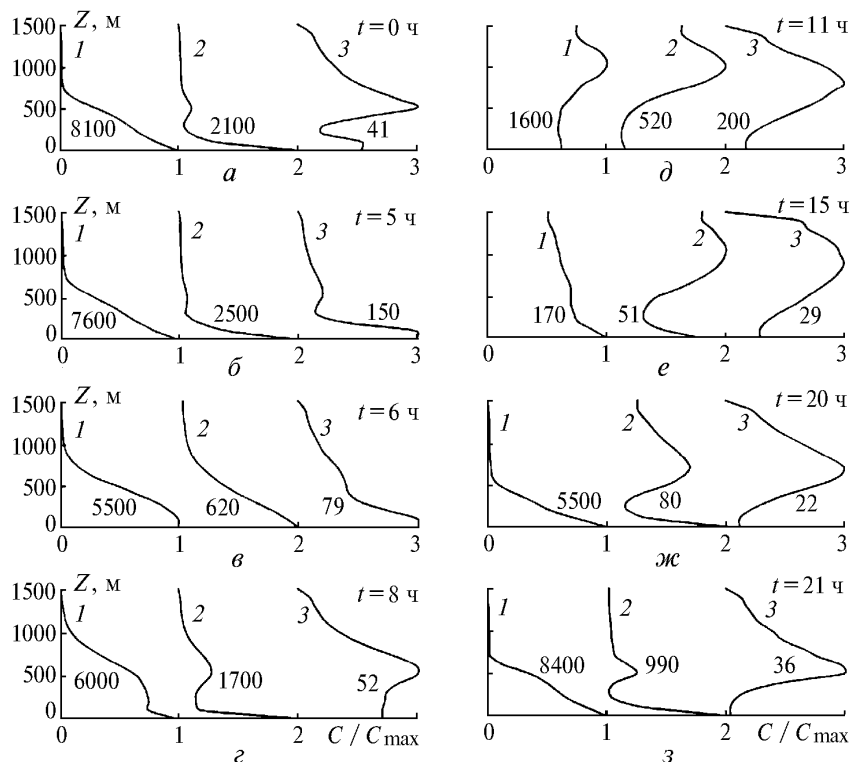


Рис. 2. Вертикальные профили концентрации примеси над центром города, его окраиной и в пригороде в различные моменты времени для плоскостного источника и штилевых условий, кривые 1, 2 и 3 соответственно

Из-за разности температур подстилающей поверхности между городом и пригородом в пограничном слое формируется типичная для «острова тепла» циркуляция. Днем в нижней части пограничного слоя над городом наблюдается горизонтальная конвергенция воздуха с восходящими вертикальными потоками над центром города. В верхней части пограничного слоя наблюдается горизонтальная дивергенция воздуха, которая растекается к периферии и в окрестности города опускается вниз (см. рис. 1, б).

Ночью все происходит наоборот (см. рис. 1, а). Такая циркуляция воздуха формирует характерное поле концентрации примесей в виде аэрозольных «шапок».

В дневные часы, за исключением времени $t = 9-11$ ч, над центром города максимум концентрации всегда находится у поверхности земли (кривые 1). Максимальное значение концентрации наблюдается в 21 ч и равно $8,4 \cdot 10^3$ усл. ед., затем оно уменьшается до $5,5 \cdot 10^3$ усл. ед. при $t = 6$ ч. С этого момента по мере нагревания поверхности города и увеличения вертикального турбулентного обмена аэрозоль переносится в верхнюю часть пограничного слоя, а профиль концентрации выравнивается. Одновременно увеличивается дивергенция в верхней части пограничного слоя, что приводит к увеличению горизонтального переноса примеси из центральной области к периферии и уменьшению концентрации в центре до $1,77 \cdot 10^2$ усл. ед. при $t = 15$ ч. Вечером и ночью, в результате уменьшения вертикального турбулентного обмена и смены типа циркуляции, максимум концентрации, увеличиваясь, перемещается в приземный слой. Над окраиной города (кривые 2) максимальные концентрации для всех моментов времени, за исключением $t = 9-15$ ч, находятся у подстилающей поверхности. Днем для $t = 9-20$ ч наблюдается необычный «S-образный» профиль концентрации с двумя максимумами (рис. 2, д-ж). Максимальное значение концентрации у поверхности, очевидно, объясняется присутствием в этой части города плоскостного источника. В результате конвергенции в нижней части пограничного слоя чистый воздух из пригорода стекается к центру и туда же сносит примесь, поднимающуюся вверх от уровня подстилающей поверхности. Это, в частности, приводит к появлению локального минимума концентрации на окраине города на высоте 300 м (см. рис. 2, е). В верхней части пограничного слоя в результате горизонтальной дивергенции примесь растекается от центра области к периферии. Это приводит к накоплению примеси и возникновению второго максимума на высоте 900 м. В ночные часы, когда в нижней части пограничного слоя наблюдается горизонтальная дивергенция, примесь переносится от центра города в пригород. Концентрация примеси в это время на окраине города примерно в 50 раз больше дневной (рис. 2, б, е).

Над пригородом (кривые 3) максимальное значение концентрации, равное $1,5 \cdot 10^2$ усл. ед., находится у поверхности земли и наблюдается при $t = 5$ ч. Днем и ближе к вечеру максимум перемещается на высоту 700–900 м, уменьшаясь до 22 усл. ед. к моменту времени $t = 20$ ч. Здесь, как и на окраине, наблюдается «S-образный» профиль с двумя максимумами, но только ночью при $t = 0-3$ ч (рис. 2, а).

В таблице приведены отношения максимальных значений концентрации над городом к ее значениям у подстилающей поверхности. Видно, что в пригороде аэрозольная «шапка» наблюдается при $t = 7-24$ ч. Концентрация в ней может превышать поверхностную в 2–8 раз, а в отдельные моменты, например при $t = 22$ ч, в 40 раз. На окраине города она наблюдается в 9–15 ч. Над центральной частью города аэрозольная «шапка» возникает только в 10–11 ч.

Время, ч	Пригород	Окраина	Центр
0	1,8	*	*
1	*	*	*
7	1,7	2,2	*
8	1,4	*	*
10	6,7	7,1	1,3
11	5,7	6,0	1,6
12	6,0	2,0	*
14	4,0	1,5	*
15	3,5	1,3	*
16	3,0	*	*
18	2,1	*	*
19	4,9	*	*
20	8,5	*	*
21	27,7	*	*
22	40,8	*	*
23	5,6	*	*

* Максимальное значение находится у подстилающей поверхности.

В следующем примере плоскостной источник включался в 6 ч и выключался в 20 ч, т.е. в вечерние и ночные часы выбросы автотранспорта отсутствовали. Дневные профили концентрации практически не меняются в сравнении с постоянным источником, а в ночных профилях наблюдается заметное отличие (рис. 2, а, б; 3, а, б). После отключения источника в $t = 20$ ч концентрация примеси в центре города у подстилающей поверхности к $t = 5$ ч утра уменьшается приблизительно в 2 раза по сравнению с постоянно действующим источником. На окраине города, как и в предыдущем случае, концентрация у подстилающей поверхности растет, хотя намного медленнее, и к моменту времени $t = 5$ ч становится равной $2,6 \cdot 10^2$ усл. ед., что примерно в 10 раз меньше, чем в это же время в рассмотренном ранее случае. В пригороде на поверхности концентрации также возрастают и к 5 ч достигает 26 усл. ед., что в 6 раз меньше, чем в предыдущем случае. При этом максимальное значение концентрации наблюдается на высоте 600 м и равно 31 усл. ед. При $t = 0-5$ ч на окраине и в пригороде наблюдается «S-образный» профиль концентрации.

Плоскостной источник при наличии ветра

Рассмотрим влияние дующего на город ветра на структуру поля концентрации над городом. В этих расчетах ветер был направлен вдоль оси x со скоростью 2 м/с на высоте 10 м. При $t = 6$ ч включался плоскостной источник (начало работы автотранспорта). К моменту $t = 7$ ч концентрация примеси достигает почти максимального значения (рис. 3, z). Примесь локализуется над городом вблизи подстилающей поверхности. Значения концентрации в центре

города равны 24 усл. ед., на окраине 31 усл. ед. и в пригороде 11 усл. ед. По мере прогревания поверхности земли и усиления турбулентного обмена вертикальная протяженность аэрозольного следа увеличивается и растет с удалением от города. Однако максимальные значения по-прежнему остаются у подстилающей поверхности. При этом они несколько уменьшаются, к вечеру начинают увеличиваться и к 20 ч достигают максимального значения, равного 33 усл. ед. в центре города, 52 усл. ед. на окраине и 22 усл. ед. в пригороде.

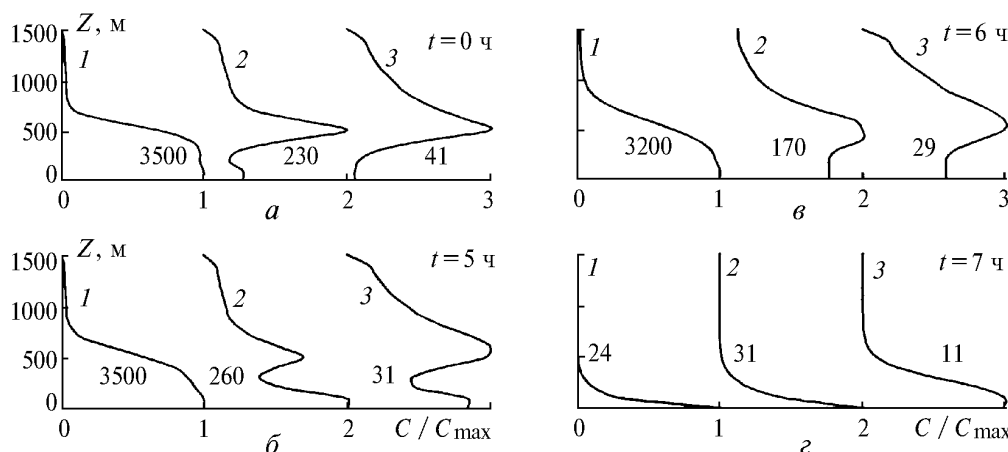


Рис. 3. То же, что и на рис. 2, но для плоскостного источника, работающего с 6 ч утра до 20 ч вечера при штилевых условиях (a – $б$) и при ветре, дующем на город (z)

При $t = 20$ ч плоскостной источник отключается (прекращение работы автотранспорта). Уже через час концентрация примеси уменьшается на девять порядков в центре города, на пять порядков на окраине и в пятьдесят раз в пригороде. Причем в пригороде она становится примерно на три порядка больше, чем на окраине, и на семь порядков больше, чем в центре. К моменту времени $t = 22$ ч концентрация везде уменьшается еще на семь-восемь порядков.

Таким образом, плоскостной источник примеси, расположенный в приземном слое на территории города, создает устойчивую аэрозольную «шапку» на высоте 700–900 м только в окрестности города при $t = 7$ –24 ч. Концентрация в ней в 2–8 раз (в отдельные моменты времени до 40 раз) может превышать концентрацию у поверхности. Над окраиной города аэрозольная «шапка» наблюдается для $t = 10$ –15 ч, а над центральной частью города она практически не наблюдается. Внешний ветер даже с небольшой скоростью 2 м/с на высоте 10 м полностью разрушает аэрозольную «шапку» и в течение часа после прекращения работы городского транспорта практически полностью очищает атмосферу города от примесей.

Точечный высотный источник

В следующей серии расчетов рассматривалось влияние высотных точечных источников. Для этого в

центре города на эффективной высоте 100 м располагается постоянно действующий точечный источник частиц. На рис. 1, $в$, $г$ представлены изолинии концентрации для $t = 5$ и 15 ч для штилевых условий. На рис. 4, a – e даны вертикальные профили концентрации над центром города (кривые 1), над окраиной города (кривые 2) и над пригородом в 4 км от города (кривые 3) для $t = 0, 6, 10, 12, 14$ и 19 ч. Над центром города максимальное значение концентрации, равное $2,4 \cdot 10^{-2}$ усл. ед., наблюдается в ночные и утренние часы и находится на высоте источника. К моменту $t = 10$ ч максимум уменьшается до $7,4 \cdot 10^{-3}$ усл. ед. и смещается вверх на высоту 900 м, при этом вертикальный профиль концентрации выравнивается. Далее максимальное значение становится еще меньше и к моменту времени $t = 14$ ч достигает минимума $3,4 \cdot 10^{-3}$ усл. ед. К вечеру максимум концентрации снова перемещается на высоту 100 м, возрастает по величине и к моменту времени $t = 0$ ч становится равным $2,4 \cdot 10^{-2}$ усл. ед. и затем почти не изменяется до $t = 5$ ч.

На окраине в пригороде зона с максимальным значением концентрации находится на высоте 700 м ночью и 1000 м днем. Наименьшие значения максимума концентрации наблюдается днем и равны $5,2 \cdot 10^{-4}$ и $2,6 \cdot 10^{-4}$ усл. ед. соответственно. К вечеру они увеличиваются и при $t = 23$ ч достигают значе-

ний $1,1 \cdot 10^{-3}$ и $3,8 \cdot 10^{-4}$ усл. ед. и далее практически не меняются до $t = 6$ ч.

Расчеты с пятью источниками, расположенными в центре квадрата и в центрах сторон, ограничивающих

город, не изменяют качественную картину распределения концентрации ни над городом, ни в пригороде (рис. 4, жс, з), а на окраине профили концентрации становятся подобными профилям в центре города.

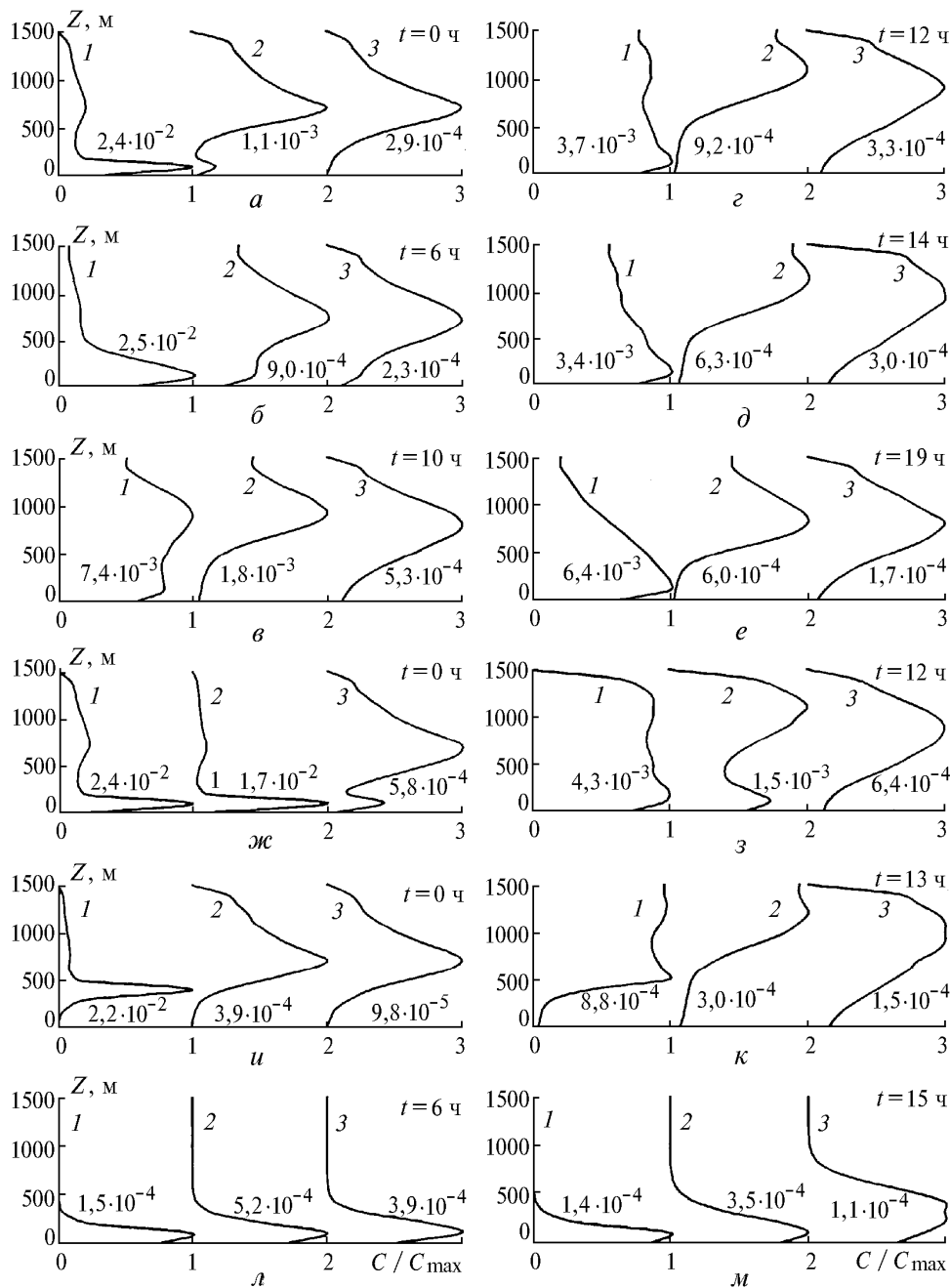


Рис. 4. То же, что и на рис. 2, но для точечного источника, расположенного на высоте 100 м (а-е), для 5 точечных источников (жс, з), для точечного источника на высоте 400 м (и, к) и для точечного источника на высоте 100 м при наличии ветра, дующего на город (л, м)

В случае, когда точечный источник находится над центром города на высоте 400 м, максимальное значение концентрации в центре области, равное $2,2 \cdot 10^{-2}$ усл. ед., наблюдается в ночное время и находится на высоте источника (рис. 4, и). Днем макси-

мум уменьшается до $8,8 \cdot 10^{-4}$ усл. ед. при $t = 13$ ч (рис. 4, к), а к вечеру увеличивается до $1,9 \cdot 10^{-2}$ усл. ед. при $t = 19$ ч и до $2,2 \cdot 10^{-2}$ усл. ед. в момент $t = 0$ ч. На окраине города и в пригороде максимумы концентрации так же, как и в случае с источником на

высоте 100 м, находятся на высоте 700 м ночью и 1000 м днем. При $t = 10$ ч они равны $1,1 \cdot 10^{-3}$ и $3,2 \cdot 10^{-4}$ усл. ед. соответственно, что примерно в 3 раза больше, чем ночью. Далее они уменьшаются и достигают минимальных значений $1,8 \cdot 10^{-4}$ и $1,0 \cdot 10^{-4}$ при $t = 16-18$ ч и затем медленно увеличиваются до значений $4,5 \cdot 10^{-4}$ и $1,2 \cdot 10^{-4}$ при $t = 21$ ч. Значения концентрации для этого варианта днем в центре примерно в 3,7 раза меньше, на окраине в 2,7 раза и в пригороде в 2,3 раза меньше, чем в случае с одним источником на высоте 100 м. Ночью эти отношения равны 1,1 для центра и 2,8 и 3,0 для окраины и пригорода соответственно. Уменьшение максимальных значений концентрации при увеличении высоты источника обусловлено увеличением области с более интенсивным конвективным и турбулентным переносом примеси.

Увеличение количества высотных источников до пяти не изменяет качественную картину полей концентрации над городом и в пригороде, а на окраине города профили концентрации становятся подобными профилям в центре города.

Высотный точечный источник и наличие ветра

Рассмотрим влияние дующего на город ветра на структуру поля концентрации для случая одного источника, расположенного на высоте 100 м. На рис. 1, *д, е* представлены изолинии концентрации, а на рис. 4, *л, м* вертикальные профили концентрации. В центре области и на окраине города максимальные значения находятся на высоте источника в течение всех суток и равны соответственно $1,4 \cdot 10^{-4}$ и $3,5 \cdot 10^{-4}$ усл. ед. днем для $t = 12-15$ ч и $1,5 \cdot 10^{-4}$ и $5,2 \cdot 10^{-4}$ усл. ед. ночью для $t = 0-6$ ч, т.е. они смещаются по потоку к окраине города. В пригороде максимальное значение находится на высоте источника в ночное время и равно $5,9 \cdot 10^{-4}$ усл. ед. при $t = 0-4$ ч. Днем максимальное значение концентрации имеет место при 200–300 м и изменяется от $1,2 \cdot 10^{-4}$ усл. ед. при $t = 12$ ч до $4,2 \cdot 10^{-4}$ усл. ед. при $t = 21$ ч.

Когда точечный источник находится на высоте 400 м, в центре области и на окраине города максимальные значения концентрации находятся на высоте источника в течение всех суток и равны соответственно $5,2 \cdot 10^{-5}$ и $1,4 \cdot 10^{-4}$ усл. ед. днем в течение $t = 12-15$ ч и $8,8 \cdot 10^{-6}$ и $3,7 \cdot 10^{-4}$ усл. ед. ночью в течение $t = 0-4$ ч.

Таким образом, максимальные значения смещены по потоку к окраине города. В пригороде максимальное значение находится на высоте источника в ночное время и равно $1,7 \cdot 10^{-4}$ усл. ед. в течение $t = 22-4$ ч. В дневное время максимальное значение находится на высоте 500–600 м и меняется от $5,9 \cdot 10^{-5}$ при $t = 12$ ч до $1,2 \cdot 10^{-4}$ усл. ед. при $t = 21$ ч. Далее максимум опускается на высоту источника, увеличиваясь до $1,7 \cdot 10^{-4}$ усл. ед. к моменту $t = 22$ ч.

В случае, когда над городом задавались пять точечных источников, расположенных в центре области и на окраинах, качественные выводы о расположении максимальных значений концентрации от одного источника полностью переносятся на данный случай. В центре и на окраине города область максимальных значений концентрации находится на высоте источников, а в пригороде в дневные часы она перемещается на высоту, на 100–200 м большую высоты источников. Ночью область максимальных значений находится на высоте источников.

Таким образом, при штилевых условиях одиночный точечный источник, расположенный над центральной частью города, создает аэрозольную «шапку» над центром города на эффективной высоте источника независимо от времени суток, а на окраине и в пригороде на высоте примерно 700 м ночью и 1000 м днем. Несколько точечных источников создают аэрозольную «шапку» над городом на некоторой эффективной высоте. В пригороде эта высота равна 700 м ночью и 1000 м днем. При наличии ветра аэрозольная шапка над городом возникает на высоте источников в течение всех суток. В пригороде ночью она наблюдается также на высоте источников, а днем по мере удаления от города она поднимается до высоты 700 м.

Выводы

Сравнение полученных теоретических результатов с данными самолетного зондирования атмосферного аэрозоля над городами России и Казахстана [1] позволяет сделать вывод об удовлетворительном, с учетом заложенных в расчетах упрощающих предположений, совпадении основных закономерностей формирования аэрозольных «шапок», касающихся максимальных значений концентрации, нормированных на их приземные значения, расположения аэрозольных шапок, а также их размеров и пространственной структуры. При моделировании процессов распространения аэрозолей над реальными промышленными центрами, в которых присутствуют различные источники на различных высотах, поле концентрации и структура аэрозольной шапки будут более сложным образом зависеть от мощности, типа и расположения источников. Однако качественные закономерности, касающиеся высоты аэрозольной «шапки», времени ее возникновения, продолжительности ее существования и пространственной структуры, по-видимому, существенно не изменятся.

1. Белан Б.Д., Ковалевский В.К., Симоненков Д.В. и др. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. № 6. С. 755–765.
2. Гутман Л.Н. Введение в нелинейную теорию мезометеорологических процессов. Л.: Гидрометеониздат, 1969. 295 с.
3. Пененко В.В., Алоян А.Е. Модели и методы для задач охраны окружающей среды. Новосибирск: Наука, 1985. 256 с.
4. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М.: Наука, 1982. 320 с.

5. Безуглая Э.Ю., Расторгуева Г.П., Смирнова И.В. Чем дышит промышленный город. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 256 с.
6. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 448 с.

7. Ландсберг Г.Е. Климат города. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 248 с.
8. Оке Т.Р. Климаты пограничного слоя. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 360 с.

ГНЦ ВБ «Вектор»,
НИИ аэриологии, Новосибирская область

Поступила в редакцию
4 февраля 1998 г.

B.M. Desyatkov, S.R. Sarmanaev, A.I. Borodulin. Numerical Modelling of the Aerosol «Tops» over the Industrial Centers.

The atmospheric aerosol dispersion over an industrial area is modelled with the use of equation of the atmospheric boundary layer dynamics involving equation for the components of wind velocity, temperature, humidity and equations for the energy flow balance on the underlying surface. Cities are the sources of aerosol pollution. They are characterized by clearly defined temperature inhomogeneity resulting in specific pollutant «tops». The mechanism of daily variations in aerosol concentration obtained for the various meteorological conditions is discussed.